

대기오염 피해를 받은 서울시내 가로수의 엽록소함량과 광합성 특성

우수영¹ · 이성환¹ · 이동섭²

¹서울시립대학교 문리과대학 환경원예학과

²상주대학교 산림환경자원학과

(접수 2004년 1월 9일; 수락 2004년 2월 23일)

Air Pollution Effects on the Photosynthesis and Chlorophyll Contents of Street Trees in Seoul

Su-Young Woo¹, Sung Han Lee¹ and Dong-Sup Lee²

¹ Department of Environmental Horticulture, University of Seoul, Seoul, 130-743, Republic of Korea

² Department of Forest Resources and Environment, Sangju National University, 742-711 Republic of Korea

(Received January 9, 2004; Accepted February 23, 2004)

ABSTRACT

The purpose of this study was to identify the effects of air pollution on the street trees in Seoul. Ten *Ginkgo biloba* street trees were selected in both Jongno (polluted area as a control) and Yangjae (non-polluted area) to investigate chlorophyll contents, photosynthesis and antioxidant enzymes such as APX (Ascorbate peroxidase) and GR (Glutathione reductase). The sampling, measurements and analysis were conducted in August. Chlorophyll contents and photosynthesis of *Ginkgo biloba* grown in Yangjae were higher than those of Jongno in the August measurement. In contrast, APX and GR activities of *Ginkgo biloba* grown in Yangjae were lower than those of Jongno. The observed tree responses are considered to be atypical compensatory response to polluted locations.

Key words : air pollution, chlorophyll contents, enzyme, photosynthesis, Seoul, trees

I. 서 론

최근 대기오염이 대도시에서 문제로 떠오르면서 대도시 가로수와 도시림에서의 대기오염(O₃, NO₂, SO₂, Acid rain)이 수목에 미치는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 서울은 1,200만여명의 시민이 생활하는 도시이며 자동차의 매연으로 인해서 가로수 및 도시림의 식물이 피해를 받고 있는 실정이다. 특히 최근에는 여름에 오존 주의보가 발령될 정도로 오염물질이 도시민의 생활에 문제가 되고 있어서 이에 대한 연구가 필요한 실정이다.

특히 서울은 대기오염을 효율적으로 규제하여 1차

대기오염물질인 NO₂, SO₂, 등은 그 농도가 상당히 낮아졌지만 1차대기 오염물질을 바탕으로 높은 온도나 자외선이 강한 날에 발생하는 O₃ 같은 2차 대기오염 물질은 그 정도가 심각한 수준을 넘고 있다. 이는 인간 건강에도 큰 문제를 일으키지만 식물도 큰 피해를 받을 수 있어서 주의가 요구된다.

국내에서도 대기오염과 가로수 및 식물에 대한 연구를 여러 방면에서 추진하고 있다. 그러나 지금까지의 연구는 대기오염이 식물생장에 미치는 현상을 확인하는 정도로 머물고 있으며, 공해에 저항성을 가지거나 반대로 대기오염에 아주 약한 개체가 왜 다른 반응을 보여 주는지를 명확하게 설명하지 못하고 있다. 그리

고 도시에서 대기오염에 피해를 받은 가로수가 많이 죽거나 생장이 줄어드는 현상이 자주 나타나는데 이들에 대한 연구가 미흡한 현실이다.

식물의 생장에 직접적인 영향을 미치고 대기오염에 피해를 받은 식물이 보여주는 광합성 변화와 엽록소함량에 대한 연구는 그 자료가 극히 부족한 상황에 있다(Wang *et al.*, 2003; Kimmins, 1987). 엽록소함량은 식물이 광합성을 하는데 필수적인 요소이고 광합성은 엽록소를 바탕으로 일어나기 때문에 엽록소와 광합성이 어떠한 관련이 있는지 알아보는 것은 대기오염 피해를 이해하고 피해 메커니즘을 규명하는데 필수적인 것이라 할 수 있다(Woo *et al.*, 2003; Winner, 1994).

대기오염물질이 식물의 내부로 들어왔을 때 식물체의 해독대사에는 다양한 항산화효소가 관여한다. 식물체내 활성산소류 발생에 대한 방어기작에서 항산화효소의 활성은 중요한 역할을 한다. 또한 이들의 활성을 측정함으로써 대기오염으로 인한 피해정도나 저항성 기작을 이해함에 있어서 도움이 될 수 있다(Baczek and Koscielniak, 2003). 특히 glutathione reductase (GR)와 ascorbate peroxidase(APX)의 경우 주로 활성산소의 독성을 완화하는 항산화효소로 대기오염에 노출된 식물체의 엽록체 함량과도 관계가 있을 것으로 보인다(Kangasjarvi *et al.*, 1994; Winner, 1994; Mooney *et al.*, 1988).

따라서 본 연구는 서울시내의 은행나무 가로수를 대상으로 대기오염이 심각한 지역과 대기오염이 심각하지 않은 지역에 생육하는 개체간의 생리적인 활성 즉 엽록소함량, 광합성효율과 항산화효소의 활성을 비교 분석하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 가로수 개황

서울시내의 대기오염이 심한 지역으로 추정되는 종로 2가의 은행나무(*Ginkgo biloba*) 가로수와 피해가 덜한 지역이라고 판단되는 양재동의 가로수를 대상으로 비슷한 영급의 개체를 선정하였다. 생장추를 이용하여 11-13년생의 변이를 최소로 하여 가로수를 각각 10본을 선정하였다. 그리고 이들의 광합성 특성, 엽록소 함량과 항산화효소활성을 8월에 조사하여 그 차이를 비교 분석하였다.

2.2. 광합성 능력 측정

은행나무의 광합성 변화는 portable infra-red gas analyzer(LI-6400, LI-COR, Lincoln, NE)를 사용하여 했다. 생장과 모든 생리적인 활성이 최고에 이른 8월에 조사하였다. 측정시 leaf chamber 내 CO₂농도는 CO₂ injector system을 이용하여 400 μmol mol⁻¹로 유지하였다. leaf chamber 내부 온도는 22°C였으며, 6400-02 LED light source를 이용하여 PPFD 0, 20, 50, 100, 200, 500, 800, 1000, 1500, 1800 μmol · m⁻²s⁻¹에서의 광합성을 변화를 측정하였다. 순 광합성량은 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$A_n = \frac{U_e(C_e - C_c)}{100s} - C_cE$$

where A_n Net Photosynthesis(mol CO₂m⁻²s⁻¹), U_e mole flow rate of air entering the leaf chamber(mols⁻¹), C_e mole fraction of CO₂ in the leaf chamber(molCO₂mol⁻¹ air), C_c mole fraction of CO₂ entering in the leaf chamber(mol CO₂ mol⁻¹ air), s leaf area(cm²), E transpiration(mmol H₂Om⁻²s⁻¹)

2.3. APX 활성분석

Ascorbate peroxidase(APX)의 활성분석은 엽맥을 제거한 잎 단편 0.2g에 1M 아스코르빈산(AsA)과 pH가 7.4로 보정된 100mM 인산칼륨 완충액(K-P buffer)을 함유한 추출용액 2mL를 가하여 균질화하였다. 이를 16,000rpm에서 30분간 원심분리한 후 추출액 60μL를 취하여 반응액 [H₂O 2.34mL, 1M K-P buffer(pH 6.5) 300μL, 10mM AsA 180μL, 5mM H₂O₂ 120μL]과 잘 혼합한 후 UV spectrophotometer(UV-2100, Shimadzu, Japan)를 사용하여 파장 290nm에서 H₂O₂에 의한 30초간의 아스코르빈산 산화도(extinction coefficient of 2.8 mM⁻¹ cm⁻¹)를 측정하였으며 효소활성은 단백질 1mg을 기준으로 산정하였다.

2.4. GR 활성분석

Glutathione reductase(GR)의 활성 분석은 잎에서 엽맥을 제거하여 0.15g을 채취한 후 추출용액(50mM K-P buffer, 5% PVP, 5mM AsA, 5mM DTT, 5mM EDTA, 0.1M NaCl 함유)을 2mL 가하여 균질화하였다. 12,000rpm에서 5분간 원심분리한 후 상장

액 150 μ L를 취하여 반응액(H₂O 2.43mL, 1M K-P buffer(pH7.8) 300 μ L, 10mM GSSG 60 μ L, 10mM NADPH 60 μ L)과 혼합하였다. 이때의 산화·환원 반응을 파장 340nm에서 90초간의 흡광도 변화로 측정하였다(extinction coefficient of 6.2 mM⁻¹cm⁻¹). 효소 활성은 단백질 1mg을 기준으로 산정하였다. 단백질 정량은 Bradford(1976)가 기술한 바와 같이 Bio-Rad Protein assay(Bio-Rad Laboratories, U.S.A) 5배 희석액에 엽 추출액을 100 : 1로 가하여 반응시킨 후 파장 595nm에서의 흡광도를 측정한 후 정량식에 따라 정량하여 효소의 활성계산에 이용하였다.

2.5. 엽록소 함량 측정

엽록소함량은 휴대용 측정장치인 SPAD 502(Minolta device)를 이용하여 현장에서 측정을 하고 측정된 값을 채취하여 Arnon(1949)의 방법으로 회귀식을 구한 후 다음에 현장에서 조직을 파괴하지 않고 그대로 환산하는 방법을 취했다. 실험실로 잎을 가져온 후 신선한 잎 0.1g을 80% 아세톤으로 3일간 냉암소에서 침출시킨 후 UV spectrophotometer(UV-2100, Shimadzu, Japan)를 이용하여 파장 645nm와 663nm에서의 흡광도를 측정하였다. 엽록소 함량은 아래 식을 통하여 mg · g⁻¹ FW 기준으로 계산하였다(Arnon, 1942).

$$\text{Total Chlorophyll} = 20.2 \times A_{645} + 8.02 \times A_{663}$$

III. 결과 및 고찰

3.1. 엽록소 함량

엽록소함량은 식물이 광합성을 하는데 필수적인 색소로 알려져 있고 지구상에 가장 많은 색소 가운데 하나다. 엽록소함량은 일반적으로 광합성 능력과 비례하는 것으로 알려져 있는데, 식물의 엽록소함량은 대기오염 같은 스트레스를 받으면 황화나 백화현상으로 붕괴되는 현상을 많이 보여준다. 그러므로 엽록소 함량을 분석해서 광합성 효율을 간접적으로 추정하면 식물이 대기오염에 피해를 받고 있는지 아닌지를 어느 정도 알 수 있다(Baczek and Koscielniak, 2003; Kim *et al.*, 2001).

그러나 지금까지 엽록소 함량을 추정하는 방법은 잎 조직을 파괴하면서 채취해서 엽록소를 추출하여 spectrophotometer를 이용하여 정량하는 방법이었다.

이 방법은 잎 조직을 채취하여 파괴하는 단점이 있고, 엽록소의 분석시에 온도, 환경에 따라서 변동이 심한 점이 문제였다. 이러한 단점을 보완하기위해서 SPAD 502 같은 기계를 활용하여 엽록소 함량을 추정하고 있다. 이 기계는 잎 조직을 파괴할 필요가 없고 현장에서 즉시 추정 값을 얻을 수 있는 장점이 있는 반면, 측정값의 단위가 없는 것이 단점이다. 그렇기 때문에 이 기계로 얻은 값과 아세톤으로 엽록소를 추출한 값을 비교하여 상관식을 만들고 사용한다면 잎 조직을 파괴하지 않고 엽록소함량을 추정할 수 있는 장점이 생긴다.

은행나무의 엽록소 함량은 SPAD 502의 값과 아세톤 추출 값이 밀접하게 높은 정의 상관관계를 보였다(Fig. 1). 상관계수도 높은 값을 보였다(R²=0.9226). 은행나무를 대상으로는 아직까지 이 기계를 이용한 회귀식을 구한 보고가 없으므로 앞으로 이 식을 이용해서 종로와 양재동 지역의 은행나무 엽록소 함량을 은행나무의 잎 조직을 파괴하지 않고 현장에서 즉시 추정할 수 있을 것이다.

서울시내의 가로수는 대기오염의 피해를 가장 많이 받을 수 있는 시기는 아마도 8월일 것이다. 왜냐하면 서울시내의 대기오염은 SO₂ 같은 1차 대기오염 물질은 그동안의 노력으로 많이 감소한 것으로 보고되고 있으나 1차 대기오염물질을 바탕으로 한 2차 대기오염 물질의 농도는 증가하는 것으로 보고 되기 때문이다. 특히 오존은 여름철 고온이 계속되는 시기에 발생하는 것으로 알려져 있다. 그렇기 때문에 이 연구에서는 엽록소 함량을 대기오염 가운데 오존이 심각할 것으로 생각되는 8월에 분석하였다(Fig. 2).

종로지역은 양재동지역보다 오존의 농도가 낮은 것으로 보고되고 있다. 양재동 지역의 은행나무의 엽록

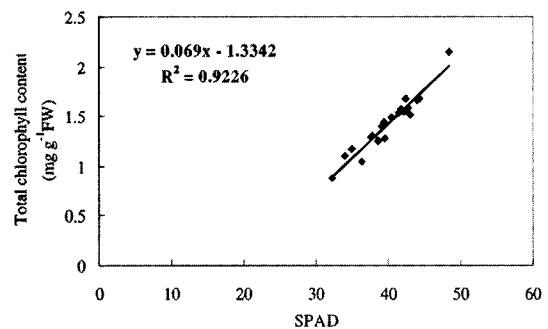


Fig. 1. The relationship between total chlorophyll contents and SPAD values.

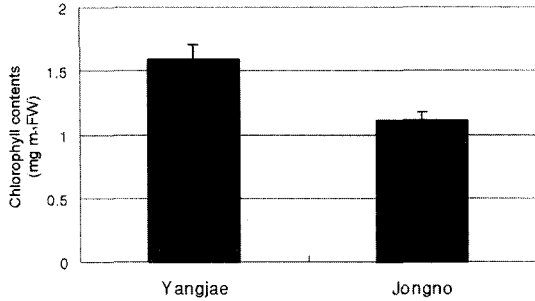


Fig. 2. Total chlorophyll contents of two sites in August.

소함량은 종로지역보다 높은 것으로 나타났다(Fig. 2). 이것은 양재동에 있는 은행나무 가로수는 대기오염의 피해를 종로의 은행나무보다 적게 받고 있다는 간접적인 증거가 될 수 있을 것이다. 식물의 생리적인 대사 활동이 양재동의 은행나무가 종로지역의 은행나무보다 좋다는 간접적인 증거도 된다.

이미 종로지역의 은행나무를 대상으로 엽록소함량을 측정한 바가 있다(Kim et al., 2001). 그러나 이 연구도 역시 SPAD 502를 이용하여 측정하였을 뿐 아세톤으로 추출한 엽록소함량과의 비교는 하지 않았다. 이 연구의 결과도 역시 공해가 약간 심하다는 종로지역의 은행나무의 엽록소함량이 태능지역 보다 파괴된 정도가 약간 심한 것으로 보고하고 있어서 연구 결과가 어느 정도 일치하는 것을 알려주고 있다.

3.2. 광합성능력

광합성능력은 광도가 변화하는 것에 상관없이 양재동의 은행나무가 종로의 은행나무보다 높은 것으로 나타났다(Fig. 3). 일반적으로 식물의 광합성능력은 엽록소함량과 밀접한 관련이 있다(Woo, 2003; Ashraf et al., 2002). 양재동 은행나무 가로수의 엽록소함량이 종로지역의 은행나무보다 높은 것으로 나타난 것은(Fig. 2) 광합성능력이 높아지는 원인 가운데 하나가 될 수 있다.

특히 8월 달의 광도가 $20\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 정도의 낮은 광도에서는 두 장소 가로수의 광합성능력이 차이가 거의 없다가 광도가 높아질수록 광합성능력이 차이가 나는 것으로 나타났다(Fig. 3). 이 같은 결과는 식물의 생장이 시작되는 아침부터 저녁까지 하루 종일 광합성능력이 차이가 많이 난다는 것을 의미한다. 침엽수의 경우 약간의 예외는 있지만 광도가 높을수록 엽록소함량이 증가하며 이는 광합성능력을 높이는 요인이 된다

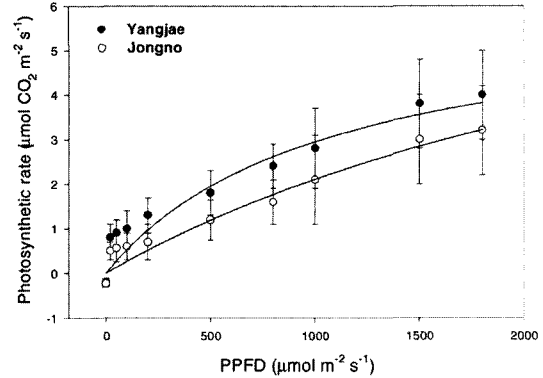


Fig. 3. Changes of photosynthetic rate of two sites in August.

고 이미 *Abies holophylla* 수종을 대상으로 보고하고 있다(Woo, 2003). 이는 광도가 높아지면 책상조직이 두꺼워지며 이는 엽육세포의 엽록소함량을 증가시키는 원인이 되는 것으로 알려져 있다(Kozłowski and Pallardy, 1997; Oliver, 1996).

양재동의 은행나무가로수가 종로지역의 은행나무보다 높은 광합성능력을 보이는 것은 아마도 시내의 대기오염과도 밀접한 관련이 있을 것으로 보인다. 일반적으로 종로지역의 대기오염이 높기 때문에 종로지역의 가로수의 광합성능력이 양재동 은행나무가로수의 광합성능력보다 낮아졌을 것이라고 짐작된다. 그렇지만 대기오염에 대해서 광합성능력이 줄어든다 하더라도 계속 어느 정도의 생장을 유지할 수 있는 것은 아마도 종로지역의 은행나무 가로수가 대기오염에 오랜 기간동안 생태적으로 적응을 해서 광합성능력이 일정 수준 유지되는 것으로 보인다. 일반적으로 대기오염에 적응을 한 식물은 광합성 능력이 대기오염피해를 받더라도 빨리 회복이 된다는 것을 여러 수종에서 보고하고 있다(Woo et al. 2003).

3.3. APX 활성

APX는 대표적인 항산화효소 가운데 하나다. 이는 활성 산소를 독성이 약한 쪽으로 완화시키는 작용을 하는 SOD(Superoxide dismutase)와 더불어서 대표적인 항산화 효소이다.

종로지역 은행나무의 APX 활성이 양재동의 APX 활성보다 높은 것으로 나타났다(Fig. 4). 이는 은행나무가로수가 식물의 compensation strategy 가운데하나인 보상 전략을 하면서 생존하고 있다는 것을 보여주

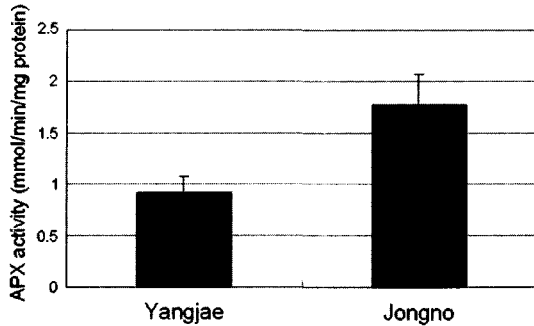


Fig. 4. APX activity of two sites in August.

고 있다. 식물은 대기오염이나 수분부족 등의 stress를 받게 되면 조기낙엽, 낙지, 단풍 등을 통해서 노화를 촉진시키며 불필요한 조직을 떨어뜨리는 전략을 가지게 된다(Kangasjarvi *et al.*, 1994; Winner, 1994; Mooney *et al.*, 1988; Reich *et al.*, 1984, 1983).

종로지역의 은행나무는 대기오염이 양재동보다 심한 관계로 식물 잎 조직의 APX 활성을 높이는 방향으로 보상전략을 나타낸다고 볼 수 있다. 이는 대기오염 가운데 SO_2 에 노출된 가중나무, 참나무가 광합성능력을 높이는 것에서도 알 수 있다(Woo *et al.*, 2003). 대기오염에 노출된 식물개체가 대기오염에 노출되지 않은 식물개체보다 높은 광합성 능력을 보여주는 것은 APX 효소활성을 높여서 열악한 환경을 극복하기위한 식물이 가지는 전략이라고 볼 수 있다.

3.4. GR 활성

GR 활성 역시 APX와 비슷한 경향을 보였다(Fig. 5). 8월달의 GR 활성은 종로지역의 은행나무가 양재동의 은행나무보다 높은 것으로 나타났다. 이는 APX와 마찬가지로 열악한 환경인 대기오염을 극복하기위해서

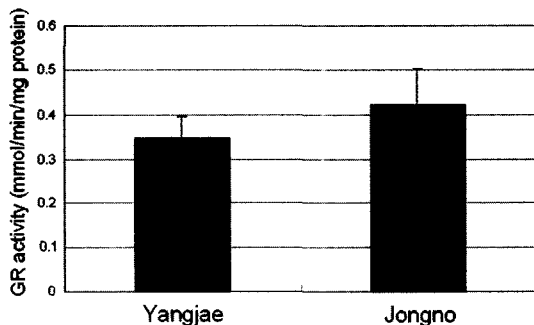


Fig. 5. GR activity of two sites in August.

GR의 활성이 높아진 것으로 추정할 수 있다.

이는 종로지역의 대기오염으로 인해서 은행나무의 기공을 통해서 들어온 oxidant가 식물체내에서 활성산소(O_2)로 전환되고 이를 해독하는 과정에서 GR의 활성이 상대적으로 높아진 것으로 짐작된다. 이러한 결과는 포플러에서도 대기오염이 식물체내에 들어오면 항산화효소의 농도가 높아져서 대기오염물질이 해독되는 것으로 알려져 있다(Reich *et al.*, 1984; 1983).

지금까지 도시에서는 보고된 결과들에 의하면 화석연료사용에 의해 발생하는 sulfur dioxide(SO_2), hydrogen fluoride(HF), nitrogen oxides(NO_x) 등이 식물에 심각한 피해를 유발하는 것으로 알려져 있으며 이외에도 NO₂나 O₃등의 광화학반응에 의해 형성되는 ozone(O₃)이나 peroxyacyl nitrates(PAN) 등이 식물피해를 유발하는 주된 대기오염물질로 알려져 있다.

이 같은 대기오염물질에 의한 식물피해로서 대부분 엽록소의 파괴와 광합성감소가 보고되고 있으며 이는 기공수준에서 탄소의 흡수가 제한되거나 엽록체 파괴 및 Calvin cycle 또는 광합성 관련효소인 RubisCO가 영향을 받기 때문인 것으로 알려져 있다. 이 같은 엽록소파괴와 광합성 감소 현상은 체내 동화산물 이용이 제한되는 것에 의해 전류가 억제되는 현상을 유도하기도 하며 이는 엽내 탄수화물축적을 유발함으로써 곤충섭식에 좋은 조건을 형성하여 병해충에 대한 감수성을 증대시키는 것으로도 보고되고 있다(Kimmins, 1987).

이 같은 연구결과들을 토대로 대기오염에 대한 감수성 및 내성이 높으면서 오염물질에 대한 흡수 및 흡착력이 높은 수종을 환경정화수로 선발, 도시나 공단 녹지에 실용화하고 있는 예가 많다. 미국 EPA는 1976년 식물과 토양의 대기오염물질 감소인자를 종합한 바 있으며 일본의 경우 녹지기능검토를 통해 대기정화식수 지침을 발간하고 이 지침에 의해 약 90여종의 대기정화수를 대상으로 각 지역별로 수목을 선정, 식재하는데 활용하도록 하고 있으며 실제로 많은 효과를 올리고 있다.

국내에서도 대도시의 대기오염과 가로수 및 도시림 수목 성장과의 연구를 통해서 피해 메커니즘을 밝히고 이를 활용하여 가로수 식재나 관리에 기본 자료를 구축하는 것이 필요하다.

IV. 적 요

서울시내의 대기오염이 식물에 미치는 영향과 대기

오염의 해독 메커니즘을 규명하기위해서 서울시의 대기오염이 높은 종로지역의 은행나무 가로수와 대기오염농도가 약간 낮은 양재동의 은행나무를 선정하였다. 은행나무 각 개체를 대상으로 엽록소함량, 광합성능력, 항산화효소의 활성을 분석하였다.

양재동의 은행나무가 엽록소함량, 광합성능력이 종로지역의 은행나무보다 높은 것으로 나타났고 항산화효소인 APX와 GR의 활성은 종로지역의 가로수에서 높은 것으로 나타났다. 이는 종로지역의 은행나무가 대기오염이 심한 환경에서 항산화를 극복하기위해서 항산화 효소의 활성을 높이는 것으로 짐작된다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 서울시립대학교 학술연구조성비에 의해서 연구되었습니다. 현장에서 샘플링과 실험실에서 효소분석을 도와준 서울시립대학교 문리과대학 환경원예학과의 권대영, 양수진, 이순덕, 김효정, 제선미 학생들에게 감사의 말씀을 전합니다.

인용문헌

- Arnon, D. I., 1949: Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenol -oxidase in *Betula vulgaris*. *Plant Physiology* **24**, 1-15.
- Ashraf, M., M. Arfan, M. Shahbaz, A. Ahmad and A. Jamil, 2002: Gas exchange characteristics and water relations in some elite okra cultivars under water deficit. *Photosynthetica* **40(4)**, 615-620.
- Baczek, K. R. and J. Koscielniak, 2003: Anti-oxidative effect of elevated CO₂ concentration in the air on maize hybrids subjected to severe chill. *Photosynthetica* **41(2)**, 161-165.
- Bradford, M. M., 1976: A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Annal of Biochemistry* **72**, 248.
- Kimmins, J. P., 1987: *Forest Ecology*. Macmillan Publishing Company, New York, 531pp.
- Kim, P. G., Y. B. Koo, J. C. Lee, S. W. Bae, Y. S. Yi and Y.M. Cheong, 2001: Chlorophyll content and genetic variation of *Ginkgo bioloba* planted on the street in Seoul. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **3(2)**, 114-120.
- Kozłowski, T. T. and Pallardy, S. G., 1997: *Physiology of Woody Plants* (2nd Eds.), Academic Press, London, 411pp.
- Kangasjarvi, J., Talvinen, J., Utraiainen, M., Karjalainen, R., 1994, Plant defense systems induced by ozone. *Plant Cell Environment*, **17**, 783-794.
- Mooney, H. A., Küppers, M., Koch, G., Gorham, J., Chu, C., Winner, W. E., 1988: Compensating effects to growth of carbon partitioning changes in response to SO₂-induced photosynthetic reduction in radish. *Oecologia*, **75**, 502-506.
- Oliver, C. D. and Larson, B. C., 1996: *Forest Stand Dynamics*. John Wiley and Sons. Inc. New York. 520pp.
- Reich, P. B., Lassoie, J. P., Amundson, R. G., 1983: Reduction in growth of hybrid poplar following field exposure to low levels of O₃ and SO₂. *Canadian Journal of Botany*, **62**, 2835-2841.
- Reich, P. B., Schoettle, A. W., Stroo, H. F., Troiano, J., Amundson, R. G., 1984: Effects of O₃, SO₂ and acidic rain on mycorrhizal infection in northern red oak seedlings. *Canadian Journal of Botany*, **63**, 2049-2055.
- Wang, K. Y., S. Kellomaki and T. Zha., 2003: Modifications in photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence in 20-year-old pine trees after a four exposure to carbon dioxide and temperature elevation. *Photosynthetica* **41(2)**, 167-175.
- Winner, W. E., 1994: Mechanistic analysis of plant responses to air pollution. *Ecological Applicant*, **4**, 651-661.
- Woo, S. Y., 2003: Effects of different light intensities on growth, chlorophyll contents and photosynthesis of *Abies holophylla*. *Meristem*, **3**, 1-5.
- Woo, S. Y., K. W. Kwon, J. C. Lee, J. H. Choi, and B. S. Kang., 2003: Recovery of net photosynthetic rate after SO₂ fumigation in *Quercus accutissima*, *Pinus densiflora*, *Populus alba x glandulosa* and *Acanthopanax sessiliflorus*. *Photosynthetica* **41(2)**, 319-320.